

Archeologia e Calcolatori
24, 2013, 379-394

LASER SCANNING E PHOTO SCANNING. TECNICHE DI RILEVAMENTO PER LA DOCUMENTAZIONE 3D DI BENI ARCHITETTONICI ED ARCHEOLOGICI

1. INTRODUZIONE

Le nuove frontiere della tecnologia mettono a disposizione strumenti di misura sempre più precisi e complessi per il rilievo del territorio e dei suoi monumenti. Questi dispositivi permettono di registrare in modo molto semplice i caratteri geometrici e spaziali di qualsiasi contesto archeologico o architettonico. Tuttavia, questa apparente semplificazione strumentale non deve trarci in inganno portandoci anche a una semplificazione concettuale delle metodologie di rilevamento da utilizzare e del progetto di rilievo da eseguire. È importante sottolineare che per una corretta esecuzione del lavoro non esistono né un metodo univoco né uno strumento universale, ma ogni campagna di misura consisterà in una diversa combinazione di metodologie e tecnologie (BORNAZ 2006). Per dare le corrette risposte alle problematiche da studiare, la strategia di lavoro, quindi, dovrebbe essere stabilita (in fase di definizione del progetto di rilievo) in base alle specifiche metriche e alla risoluzione strumentale. Ovviamente a queste premesse vanno sommate le condizioni ambientali in cui si svolgeranno le misure, le risorse economiche disponibili, le competenze necessarie e le strumentazioni idonee allo svolgimento del lavoro.

Oltre alla corretta definizione del progetto di rilievo bisognerà inoltre definire un protocollo di rilevamento che descriva esattamente come è stata condotta la campagna di misura, con le specifiche degli strumenti, le condizioni di ripresa, le criticità e le precisioni attese e verificate. Questa parte del progetto di rilievo sarà fondamentale per rendere la campagna scientificamente valida, trasformando le misure da fredde sequenze numeriche (organizzate, per lo più, in forma tabellare) a grafici disposti in spazi virtuali e infine in informazioni scientifiche (quindi riproducibili).

Una volta definite le condizioni al contorno, le restituzioni potranno essere verificate e, se necessario, altri gruppi di ricerca potranno in futuro controllare ed eseguire di nuovo lo stesso rilievo, magari con strumenti più moderni. Si tenga conto che proprio il confronto di misure eseguite sullo stesso oggetto d'indagine in momenti diversi (mesi o anni) è un utilissimo test di controllo e verifica della stabilità di gran parte del nostro patrimonio culturale.

Date queste premesse, potremmo definire le sequenze operative del nostro lavoro nel modo seguente:

– approfondito studio del monumento, o sito archeologico, che deve precedere la corretta definizione del progetto di rilievo;

- scelta degli strumenti di misura da utilizzare, tenendo conto delle precisioni e tolleranze necessarie;
- esecuzione delle misure, cercando di registrare tutti i parametri acquisiti durante la campagna di rilievo;
- interpretazione ed elaborazione dei dati misurati;
- scelta del modo con cui rappresentare le misure eseguite.

2. CONCETTO DI MISURA

La misurazione è un processo in cui concorrono svolgimenti intellettuali e operazioni manuali. La sequenza logica e temporale che viene utilizzata per eseguire una misura deve essere la seguente:

- Sviluppi cognitivi per concepire modelli descrittivi del processo da studiare. Questo modello teorico rappresenterà in forma sintetica il fenomeno che si vuole analizzare e studiare. Il modello mentale elaborato ovviamente influenzerà la scelta dello strumento (o la combinazione di diversi strumenti) e la corretta procedura di esecuzione del rilievo. Tuttavia, il tipo di modello elaborato dipende dallo scopo per cui le misure devono essere eseguite. Non esistono, quindi, modelli descrittivi migliori o peggiori ma solo modelli progettuali più efficaci nel rappresentare le caratteristiche dell'applicazione.
- Esecuzione delle misure. La realizzazione di queste operazioni non dovrebbe mai essere considerata come una semplice sequenza manuale di operazioni meccaniche ma tutte le fasi del lavoro dovrebbero essere accuratamente documentate. Dal controllo di tutti gli step operativi dipende, infatti, la correttezza metrica della restituzione finale.

La comunità scientifica nazionale e internazionale nel corso dei decenni ha cercato più volte di dare una definizione del concetto di misura adeguandola alle nuove scoperte scientifiche e tecnologiche. Fissata l'unità di misura, la quantità di tale grandezza potrà dunque essere univocamente specificata da un valore numerico ottenuto dal rapporto con la proprietà scelta come campione di riferimento. In questo modo è possibile fare confronti tra dati provenienti da uno stesso dispositivo e tra dati provenienti da metodi di misura e strumenti diversi. Quindi, il valore numerico di una misura è sempre relativo ai sistemi di riferimento, alle unità di misura e alle strumentazioni adottate. L'operazione di misura di una grandezza fisica, anche se eseguita con uno strumento precisissimo e con tecniche e procedimenti accurati, è sempre affetta da errori, siano essi accidentali o sistematici. La somma di questi errori evidenzia l'incertezza della misura. Il risultato della misura di un evento, pertanto, non è un unico valore bensì l'insieme dei valori probabili che assume il misurando.

Consideriamo, ad esempio, le ormai note nuvole di punti che possono essere prodotte sia con strumenti dotati di sensori attivi che eseguono scan-

sioni elettroniche per mezzo di onde elettromagnetiche, sia con tutti quei metodi fotogrammetrici che operano con strumentazioni dotate di sensori passivi (come le fotocamere digitali) e che usano algoritmi matematici basati sul riconoscimento automatico di pixel (pattern) su immagini fotografiche. La loro rappresentazione verosimile della realtà impressiona ma è necessario porsi il problema della loro correttezza metrica rispetto alle scale di rappresentazione dei dati stessi. Letture più approfondite delle tabelle numeriche fornite dalle apparecchiature ci portano a evidenziare tutta una serie di valori derivanti dall'elaborazione dei dati sperimentali (medie, deviazioni standard, distribuzioni gaussiane e andamenti statistici) che bisognerebbe sempre tenere in conto.

3. COME UTILIZZARE DATI PROVENIENTI DA STRUMENTI DIVERSI

Fatte queste precisazioni è possibile affrontare il problema della combinazione di misure provenienti da set differenti come ad esempio quelli derivanti da rilievi eseguiti in momenti diversi o in secoli diversi. Entrando nello specifico sono legittime le seguenti domande:

- Ha senso georeferenziare tramite GPS scansioni laser scanner per poi eseguire la loro successiva registrazione (mosaicatura)?
- Si possono unire dati provenienti da rilievi GPS con quelli ottenuti da un rilievo con stazione totale?
- Registrare due diverse scansioni laser mediante punti omologhi produce lo stesso risultato se questi punti si trovano a 10, 20 o 50 metri dalla sorgente/sensore?

Le risposte corrette a queste domande possono essere fornite solo a condizione di conoscere con esattezza gli obiettivi finali (forse dovremmo dire “iniziali”) del nostro lavoro, la precisione dei singoli strumenti e le loro funzionalità operative. A tal proposito è utile ricordare che:

- Un Differential Global Positioning System (D-GPS) che lavora sulla fase del segnale ha un errore medio di circa 1-2 cm. Le misure dipendono molto dalle situazioni al contorno, quali il numero e la posizione dei satelliti, rumori elettromagnetici generati da sorgenti esterne terrestri o cosmiche.
- Una Stazione Totale ha un'incertezza sulla lettura dei goniometri che può essere confinata in centesimi di grado e un'indeterminazione sulle distanze di alcuni millimetri. In questo caso però interverranno anche errori dovuti alle condizioni climatiche (un sole molto forte provoca dilatazioni dei treppiedi metallici e fenomeni di diffrazione per la trasmissione dell'onda elettromagnetica di misura mentre altri fenomeni negativi possono essere costituiti da nebbia e pioggia). Altro errore importante da tenere presente è quello generato dall'operatore nella conduzione delle misure: deve essere prestata la massima

accuratezza nell'inquadrare con il cannocchiale il punto (o prisma) da rilevare, per non parlare dell'accuratezza che si dovrebbe sempre avere nel corretto posizionamento verticale delle aste telescopiche (paline) che normalmente sorreggono i prismi.

– Le incertezze delle riprese laser scanning dipendono, come indicato nei manuali delle strumentazioni, dalle precisioni dei goniometri e dall'errore del distanziometro per le misure delle distanze o delle profondità. Secondo i dati ufficiali l'errore strumentale sarebbe ridotto ad alcuni millimetri, ma nella realtà aumenta notevolmente quando le caratteristiche fisiche dell'oggetto impediscono una corretta riflessione del segnale. In casi di bassa o eccessiva riflettanza del laser, infatti, il sensore di rilevazione non può funzionare correttamente e le misure saranno affette da molto rumore.

Per comprendere meglio il concetto di riflettanza possiamo dire che le strumentazioni laser, in generale, si basano sulla capacità che ha la materia di riflettere una radiazione elettromagnetica. Questa caratteristica dipende sia dalla composizione atomica dei corpi (distanza tra gli atomi nella materia) sia dall'angolo d'incidenza del raggio sulla superficie.

Infatti, quando una radiazione colpisce la superficie di un corpo, essa è in parte assorbita, in parte riflessa e in parte trasmessa. Si possono definire i seguenti coefficienti adimensionali (variabili tra 0 e 1), che misurano le iterazioni tra energia e materia:

- assorbività (α): è il rapporto E_A/E_I tra l'energia assorbita da una superficie e quella incidente;
- riflettività (ρ): è il rapporto E_R/E_I tra l'energia riflessa da una superficie e quella incidente;
- trasmissività (τ): è il rapporto E_T/E_I tra l'energia trasmessa all'interno di una superficie e quella incidente.

Bisogna inoltre porre l'attenzione su altri due problemi: il passo di campionamento dei punti misurati e la "registrazione" (o mosaicatura) delle diverse nuvole. Il passo di campionamento è quel parametro che descrive con più o meno accuratezza la superficie da rilevare e che andrà scelto caso per caso, in base all'articolazione più o meno complessa della superficie. Nel caso di una parete diritta, ad esempio, si potrebbe anche scegliere di eseguire rilievi con nuvole meno dense. Se invece le pareti o le strutture (antropiche o geologiche) sono complesse, si può diminuire il passo di campionamento infittendo il numero dei punti per unità di superficie. Tuttavia, aumentando il numero dei punti si rischia di rendere troppo pesante la quantità dei dati che i computer dovranno poi gestire. Infine, una scelta di scansioni con un ampio passo di campionamento potrebbe portare non solo, come già detto, a un cattivo rilevamento di strutture molto articolate, ma anche a una cattiva individuazione di tutti i punti fiduciali che rendono possibile la registrazione delle diverse nuvole.

4. APPLICAZIONI LASER SCANNER

Come detto in precedenza, la capacità che ha un corpo di riflettere dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e dalle caratteristiche fisiche della superficie riflettente. Un parametro importante per la caratterizzazione di una superficie è dato dalla sua rugosità. In generale le superfici che si comportano come perfettamente lisce riflettono in modo speculare, mentre quelle perfettamente rugose si comportano come riflettori lambertiani, nei quali la direzione di riflessione è indipendente da quella d'incidenza. Normalmente le superfici reali non si comportano né da superficie perfettamente speculare né da superficie perfettamente lambertiana ma si comportano in modo intermedio. Questo fenomeno ha come evidenza macroscopica una maggiore o minore intensità dell'onda riflessa e di conseguenza si avrà un migliore o minore rapporto segnale rumore.

Esistono poi particolari tipi di superfici dette retroriflettenti sulle quali il raggio riflesso si propaga esattamente lungo la stessa direzione del raggio incidente. La banca dati, sviluppata nell'ambito del Piano Mirato di Prevenzione sulla Radiazione Riflessa Laser della Regione Toscana (D.D.R.T. n. 4276/2009), illustra molto bene le differenti interazioni tra l'onda elettromagnetica e i vari tipi di materiale (GUASTI *et al.* 2009).

La diffusione delle tecniche laser a scansione è abbastanza recente e grazie alla disponibilità di strumenti sempre più performanti ed economici ha avuto un notevole impulso negli ultimi dieci anni. In un prossimo futuro è ipotizzabile che questa strumentazione raggiungerà le dimensioni e i costi delle fotocamere metriche.

Come noto, un sistema laser a scansione misura sull'oggetto un numero elevatissimo di punti e fornisce come risultato diretto della sessione di lavoro un insieme di coordinate tridimensionali (generalmente in un sistema di riferimento correlato con lo strumento). La nuvola di punti così generata descrive pertanto la superficie esterna dell'oggetto scansionato. Questi sistemi operano in modo quasi completamente automatico e sono in grado di registrare al secondo un numero notevolissimo di punti, a volte anche nell'ordine delle migliaia. Questo operare in modo completamente automatico costituisce una delle maggiori differenze rispetto al rilievo fotogrammetrico in cui è l'operatore in prima persona a dover scegliere gli elementi da rilevare, la distanza di ripresa rispetto alla scala di documentazione, la posizione di ripresa e l'orario ottimale in cui l'esposizione della luce solare è migliore. Nelle riprese laser scanner, invece, si tende a sottovalutare tutto questo, in quanto lo strumento è un sistema di rilevamento spaziale automatico che tende a registrare le coordinate di tutti i punti che sono colpiti dal suo raggio laser. Questa caratteristica peculiare, nella maggior parte dei casi, distoglierà l'attenzione da altre questioni importanti come ad esempio se "l'illuminazione"

del laser sull'oggetto d'indagine è ottimale (che non ci siano zone d'ombra nella ripresa), oppure se la scansione riesce a inquadrare tutti i target (almeno 3) necessari per la registrazione delle diverse nuvole.

I dispositivi a scansione laser si distinguono innanzitutto in due grandi famiglie:

- laser scanner distanziometrici;
- laser scanner triangolatori.

A loro volta i laser scanner distanziometrici si suddividono in due tipologie: strumenti che prevedono la misura del tempo trascorso tra due impulsi o tra due treni d'onda (distanziometri a impulsi); strumenti che prevedono la misura dello sfasamento tra l'onda emessa e quella ricevuta (distanziometri a misura di fase) (SGRENZAROLI, VASSENA 2007).

A seconda dello strumento utilizzato si ottengono precisioni e distanze massime misurabili (portata) differenti. Gli strumenti sul mercato utilizzano in genere distanziometri laser a impulsi che misurano il tempo di volo del segnale. La precisione ottenibile con uno strumento a tempo di volo che utilizza un laser di classe 1 è al massimo di 4-6 mm a circa 100 m, valore che decresce in modo non significativo all'aumentare della distanza. La distanza massima misurabile oggi è di circa 800-1000 m nel caso dei distanziometri a impulsi che non richiedono il prisma riflettente.

Nella tipologia a tempo di volo (Time of Flying, TOF) la distanza tra oggetto e trasmettitore è calcolata basandosi sul tempo che impiega il segnale emesso a ritornare allo strumento:

$$\text{distanza} = (\text{tempo di volo} \times \text{velocità della luce})/2$$

Questi laser scanner sono particolarmente adatti a ricoprire grandi distanze (oltre i 100 metri) e il loro impiego è perciò destinato al rilevamento in campo geologico e monumentale. Le loro risoluzioni sono comprese tra 1-2 cm.

Altre tipologie di scanner distanziometrici, come detto, si basano sul principio della differenza di fase. Questi strumenti misurano lo sfasamento tra l'onda uscente e quella rientrante. Ovviamente la precisione dipende molto dalla lunghezza d'onda del segnale impiegato e dalla precisione degli oscillatori (generatori di segnale) utilizzati. Il loro raggio di azione si estende fino a 80-100 metri con una precisione millimetrica e una risoluzione che può oscillare da 4-5 mm fino al centimetro.

Una seconda famiglia di strumenti è quella dei laser scanner che usano il sistema detto a triangolazione ottica. Il loro funzionamento è concettualmente semplice: un raggio laser, deflesso secondo un passo incrementale, colpisce l'oggetto secondo una scansione regolare e il segnale riflesso (punto o linea/lama laser) viene catturato da un sensore d'immagine a stato solido (CCD), posto a una distanza prefissata e calibrata (base) rispetto al punto da cui il

laser viene inviato all'oggetto. Questi strumenti operano su distanze minori ma offrono una precisione maggiore, anche sub-millimetrica.

Riassumendo, i punti registrati vengono restituiti mediante terne di numeri che rappresentano le coordinate spaziali. Tali coordinate vengono, in primo luogo, fornite in un sistema cartesiano (x , y e z) che ha origine nel centro strumentale e solo in una seconda fase vengono riportate nel sistema di riferimento più opportuno con semplici operazioni di rototraslazione nello spazio. In effetti, per completezza, bisognerebbe dire che i punti misurati non sono forniti solo da valori (x , y e z) ma anche di due grandezze aggiunte: il valore dell'intensità della riflettanza e quello colorimetrico del punto rilevato. Anche il valore RGB del colore, infatti, viene catturato da una piccola camera (generalmente montata all'interno dello strumento), anche se non sempre corrisponde con fedeltà al colore dello spazio rilevato. Tale difformità dipende dalla scarsa possibilità di regolare i parametri di ripresa della macchina fotografica e quindi la diversa energia della luce solare influenzerà in vario modo le riprese fotografiche. La massima distanza operativa per strumenti che operano sul tempo di volo è di alcune centinaia di metri e l'accuratezza nella determinazione delle coordinate varia in genere da alcuni millimetri a un paio di centimetri o oltre; essa è migliore per gli scanner che operano per differenza di fase, che però lavorano di solito su distanze più ridotte e con una velocità di acquisizione minore.

5. IL PARAMETRO RGB

L'uso dei laser scanner in archeologia ha subito qualche battuta di arresto a causa sia della mancanza d'informazioni attendibili sul valore del colore, sia per la difficoltà di rilevare agevolmente le superfici orizzontali del deposito archeologico (problema comunque risolvibile potendo disporre di supporti elevatori). Per quanto concerne il secondo punto, è possibile documentare i livelli orizzontali ponendo il laser su dei supporti elevatori. Il parametro colorimetrico RGB da attribuire ai punti della nuvola, invece, continua a essere il tallone di Achille per le applicazioni laser scanner in archeologia, a causa della scarsa possibilità di distinguere correttamente i limiti e le caratteristiche superficiali dei diversi livelli stratigrafici.

A dimostrazione di quanto illustrato nella prima immagine sono mostrati gli effetti negativi di un'esposizione solare non omogenea di una superficie muraria (Fig. 1). In questo caso il dispositivo registra una variazione cromatica che nella realtà non esiste. L'immagine successiva mostra invece le differenze cromatiche che si possono avere nelle scansioni effettuate in momenti diversi (Fig. 2). Ovviamente, è possibile minimizzare queste problematiche esportando l'immagine e bilanciando i colori tramite programmi specifici. Durante questa elaborazione non vengono modificati in alcun modo i parametri fondamentali dell'immagine (la risoluzione e la dimensione). Il passo finale di questo



Fig. 1 – Singola scansione eseguita presso un villaggio di pastori in Giordania (Petra). L'immagine ottenuta dalla nuvola dei punti, a cui è stata applicata l'informazione colorimetrica, mostra come l'esposizione solare falsa i colori della parte sinistra della nuvola.



Fig. 2 – Registrazione di diverse nuvole con contenuto colorimetrico prese in diverse ore del giorno da diverse posizioni della stessa area monumentale. L'effetto finale della nuvola colorata sminuisce la bellezza del modello ottenuto (Petra, al-Khazneh o "Tomba del Tesoro").

processo consiste nell'importazione dell'immagine all'interno del software di elaborazione della nuvola di punti (ad esempio Scene per la Faro), per attribuire la nuova scala cromatica alla nuvola di punti.

R.G.

6. INTRODUZIONE ALLA FOTOGRAMMETRIA DIGITALE IN ARCHEOLOGIA

Il lavoro di ricerca che si presenta s'inserisce nell'ambito dell'archeologia urbana ed è finalizzato alla conoscenza e alla conservazione del patrimonio archeologico dall'impatto della realizzazione delle grandi opere civili (MARTONE 2011). Pertanto, nel presente articolo saranno proposti alcuni aspetti peculiari che caratterizzano la metodologia di lavoro in rapporto alle finalità e agli obiettivi del Workshop.

Si può affermare che, allo stato attuale, le indagini archeologiche d'emergenza nei cantieri urbani presentano alcune problematiche relative all'approccio metodologico per la documentazione grafica. Infatti, nella maggior parte dei casi, le cooperative archeologiche preposte all'attività di scavo impiegano metodi di rilevamento diretto coadiuvati dal teodolite e dalla stazione totale. Il problema consiste non tanto nell'uso di tali metodologie d'intervento quanto nella documentazione che si ottiene: eterogenea, soggettiva e senza alcuna possibilità reinterpretativa del dato.

Se si considera la storia della fotogrammetria (inizi XX secolo; CARPICECI 2012), sembra chiaro come questa tecnica di rilevamento non sia innovativa. Semmai l'evoluzione dell'informatica e del digitale ha permesso di avere un approccio più agevole e semplificato di tale strumento d'indagine, ormai comunemente definito fotogrammetria digitale, in grado di generare nuvole di punti discontinue partendo da una serie di immagini fotografiche propriamente acquisite (CUNDARI 2012).

In archeologia l'impiego della fotogrammetria come strumento di documentazione dello scavo è piuttosto recente. Nell'ultimo decennio si è passati dal solo rilevamento diretto per trilaterazione e coltellatio a un uso più frequente delle stazioni totali (per il collegamento dei vari rilievi diretti). Più recente è la tecnica del "raddrizzamento fotografico" (fotopiano) per la documentazione della lettura modulare delle cortine murarie o delle pavimentazioni musive. Probabilmente la causa di questo "ritardo" deve essere ricercata sia nei costi molto alti delle strumentazioni tecnologicamente all'avanguardia (che spesso possono essere acquistate soltanto da enti di ricerca o da strutture universitarie), sia nella formazione "classica" degli archeologi, solitamente poco inclini al passaggio verso nuove metodologie e tecniche di rilievo (D'AGATA, ALAURA 2009).

Il processo osmotico delle nuove metodologie in campo archeologico è in atto grazie soprattutto all'opera degli enti di ricerca e delle università,

anche se con una distribuzione territoriale disomogenea. All'uso delle tecniche di rilevamento tuttavia non è sempre associata un'adeguata conoscenza dei principi che ne sono alla base, con una forte ripercussione sull'uso inconsapevole rispetto ai limiti e alle potenzialità di tali metodologie.

7. I CANTIERI DELLA METROPOLITANA DI ROMA

In questo paragrafo si descrivono i risultati di una ricerca sulle tecniche operative di documentazione degli scavi archeologici condotti nell'ambito dei lavori per la realizzazione della futura stazione di San Giovanni (Linea C). Questo lavoro è stato condotto, a partire dal 2010, dall'équipe di rilievo dell'Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali (ITABC), sotto la supervisione del Commissario delegato per le Aree Archeologiche di Roma e Ostia Antica del Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MIBAC), in collaborazione con la Metro C S.c.p.A., la Soprintendenza Speciale per i Beni Archeologici di Roma (SSBAR) e a supporto della Cooperativa Archeologia (CA).

L'area d'indagine si trova poco fuori le mura Aureliane, in prossimità di Largo Brindisi (zona San Giovanni), in un'area dove le indagini preliminari e i carotaggi avevano restituito dati storico-archeologici di grande importanza (REA 2011). L'obiettivo principale della sperimentazione era la ricerca di una metodologia di acquisizione (e restituzione) versatile, rapida e caratterizzata dall'impiego di strumenti avanzati per il rilievo 3D e che allo stesso tempo favorisse la velocità delle indagini di scavo migliorando, quando possibile, l'affidabilità, la leggibilità e la fruibilità delle restituzioni. Inoltre erano previste la creazione e la gestione di un database finalizzato allo studio complessivo dell'area nel quale inserire tutte le informazioni raccolte.

Un lavoro di ricerca del genere, in un ambito così complesso come quello cantieristico legato alle infrastrutture della metropolitana, ha richiesto una grossa responsabilità scientifica e uno sforzo fuori dal comune per un progetto della durata di 30 mesi, distribuito giornalmente sull'alternanza di fasi di acquisizione ed elaborazione su una superficie che ricopriva un rettangolo di 3000 m² ca. per uno spessore di 15 m ca. e con problemi operativi strettamente connessi al cantiere edilizio stesso. L'indagine archeologica, infatti, è stata completamente eseguita sotto copertura successivamente all'inserimento dei solai della stazione (Fig. 3). Pertanto le coperture di ciascun solaio permettevano una luce di ripresa compresa tra i 3 m e i 7 m ca. a seconda della profondità dello scavo. Le varie sperimentazioni sulle singole zone d'intervento dovevano inoltre permettere l'indipendenza e il procedere dei lavori infrastrutturali evitando possibili rallentamenti. In totale sono stati eseguiti più di 250 interventi di rilevamento fotogrammetrico su tutta l'area, per la ricostruzione tridimensionale del deposito archeologico.



Fig. 3 – L'immagine ben rappresenta l'atipicità dello scavo e della documentazione grafica effettuata sotto copertura e durante la costruzione delle infrastrutture. Da notare l'illuminazione completamente artificiale.

Se si considera il rilievo come un sistema aperto di conoscenza (CUNDARI 2012), il primo passo consiste nell'avere dei dati che possano essere letti, interpretati ed elaborati sotto forme diverse, per ottenere informazioni approfondite. Oltretutto la documentazione grafica archeologica è la base principale per eseguire tutti gli studi scientifico-interpretativi. Obiettivo del lavoro è stato dunque quello di utilizzare la fotogrammetria digitale per avere una rappresentazione omogenea e oggettiva dell'esistente, con la conseguente possibilità di reinterpretazione del dato nel tempo. Inoltre il fine è stato anche quello di ridurre i tempi di acquisizione dei dati sul campo, per agevolare la prosecuzione dei lavori, rispettando i crono-programmi stabiliti in fase preliminare.

In primo luogo è stato stabilito un protocollo operativo sia per la fase di acquisizione che per quella di elaborazione dei dati (GABRIELLI, REA 2011). Tale protocollo operativo, seppur tarato e adattato di volta in volta alle molteplici esigenze cantieristiche, è stato applicato ed eseguito in maniera corretta in tutte le sue parti dal gruppo di ricerca, al fine di garantire dei risultati scientificamente validi e coerenti. Di seguito si riportano le linee guida adottate:

– Sopralluogo dell'area d'indagine. In questa fase si assegnano i ruoli all'interno dell'equipe per il corretto svolgimento del lavoro e attraverso la redazione e l'analisi degli eidotipi e delle caratteristiche morfologiche del terreno e delle strutture, si stabiliscono le linee guida del rilievo topografico e del posizionamento delle mire a terra, le riprese fotogrammetriche ottimali nonché l'organizzazione generale sul campo in funzione del lavoro di scavo archeologico e soprattutto di quello infrastrutturale.

– Rilievo topografico. Tranne che per l'organizzazione della poligonale generale (di supporto a tutto il rilievo, georeferenziata rispetto alle esigenze di cantiere ed effettuata nei primi giorni di lavoro), in questa fase si decidono il posizionamento della sottorete topografica (relazionata in un unico sistema di riferimento), l'acquisizione delle mire sulle stratigrafie e sui resti murari (Ground Control Points) e la correzione di eventuali errori nell'acquisizione fotogrammetrica. L'esperienza maturata in alcuni test preliminari ha permesso di stabilire il posizionamento ottimale delle mire (punti utili per l'elaborazione fotogrammetrica e la georeferenziazione delle singole prese fotografiche). Infatti, a causa del numero di target che devono coprire tutta l'area d'indagine in rapporto al tipo di ripresa che si vuole eseguire (se da terra o da cestello), questa fase può essere considerata una delle più prolungate. Nel caso specifico della stazione San Giovanni è stata creata una sottorete topografica *ad hoc* fissata sulle paratie laterali in cemento armato di ciascun solaio, tale da coprire tutto l'areale dello scavo.

– Ripresa fotogrammetrica. L'acquisizione dei dati fotografici è da considerare l'attività principale di tutto il lavoro poiché dalla qualità e dalla correttezza delle riprese dipende tutta la fase di post-processing. La tecnica di rilevamento utilizzata è basata sul principio della stereoscopia e impiega tre camere digitali (Nikon D80 con Obiettivo Nikkor 24mm) poste (a una distanza nota e variabile) su una barra lineare per riprese parallele. Grazie allo sviluppo di algoritmi basati sui principi della geometria epipolare, è possibile il riconoscimento automatico di punti omologhi nelle immagini, per ottenere successivamente l'elaborazione di nuvole di punti molto dense che hanno la caratteristica di conservare il valore colorimetrico della fotografia (ANGELINI *et al.* 2012). Per i prospetti murari sono state fatte delle riprese da terra con l'ausilio di un treppiede che ha facilitato la ricerca delle impostazioni ottimali della fotocamera. Inoltre, il sistema è stato utilizzato da un piccolo ponteggio mobile e da un cestello per l'acquisizione delle superfici orizzontali. Da un'altezza di ca. 6 m è stato possibile riprendere aree (per ciascuna ripresa) di 20 m² e giornalmente sono state effettuate più di 400 acquisizioni fotogrammetriche. Inoltre, essendo il sistema basato sull'interdistanza nota e simmetrica delle camere, ciascuna ripresa è risultata essere metrica e misurabile rispetto al proprio sistema di riferimento.

– Elaborazione dei dati. Questa fase si può suddividere in due sotto fasi, di cui la prima sul campo, per il controllo e la verifica delle operazioni di acquisizione (finalizzate allo svincolo dei monumenti e dunque al proseguimento

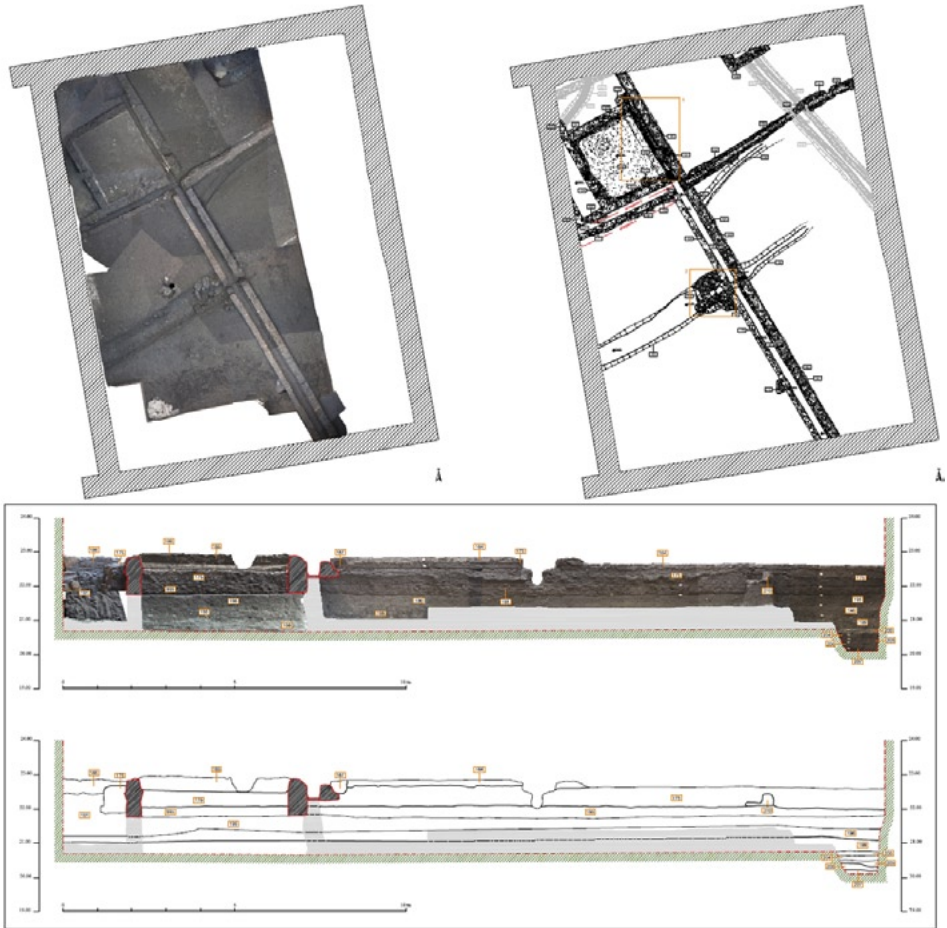


Fig. 4 – Piante, prospetti e sezioni restituiti e caratterizzati direttamente sulle ortofoto ottenute dalle nuvole di punti.

dei lavori); la seconda, più complessa, relativa alla generazione dei modelli numerici dai quali ottenere le restituzioni finali.

– Restituzioni finali. Allo stato attuale l'elaborazione dei dati ha fornito modelli numerici a nuvola di punti e orto-foto dettagliate per le piante, i prospetti e le sezioni (Fig. 4). Inoltre sono state vettorializzate e caratterizzate direttamente su orto-foto le strutture archeologiche con scale di rappresentazione idonee alla consegna finale (1:50 per le piante; 1:20 per i prospetti).

Lo sviluppo futuro del lavoro consisterà nella trasformazione dei modelli numerici in modelli digitali per una lettura complessiva del deposito



Fig. 5 – Modello numerico a nuvola di punti di una parte dello scavo.

archeologico (Fig. 5). Contemporaneamente sarà necessario impostare lo sviluppo della piattaforma GIS, inserendo i dati derivanti dalla documentazione grafica assieme alle informazioni descrittive e storiche della schedatura archeologica.

8. CONSIDERAZIONI FINALI

Il nostro gruppo di ricerca, come molti altri in Italia, è convinto che non esistano metodi universali per lo svolgimento di un'attività di rilievo sul campo, ma che l'integrazione di più tecniche (utilizzate scientemente rispetto agli obiettivi del lavoro) porti di fatto al risultato ottimale. Quindi, per validare

una metodologia di rilievo – a prescindere dal suo stato di avanzamento tecnologico – è necessario utilizzarla quotidianamente, tarandola di volta in volta rispetto alle problematiche generali cui è soggetta. L'approccio metodologico fotogrammetrico utilizzato nei cantieri della metropolitana di Roma ha fatto emergere proprio questa considerazione: l'uso intensivo della fotogrammetria in ogni fase del cantiere e per la ripresa di qualunque emergenza archeologica ha dato la possibilità di capire le grandi potenzialità di questa tecnica. L'uso quotidiano in rapporto ai problemi logistici, temporali e di scavo ha fatto emergere la grande adattabilità dello strumento alle condizioni più estreme di ripresa, mantenendo comunque una buona affidabilità e qualità di tutto il lavoro. Lo scavo archeologico nei contesti urbani, dettato dalla necessità di opere pubbliche, è un test "dinamico" di lavoro in cui non solo non è possibile reiterare le misure (a causa dell'azione distruttiva dello scavo), ma oltretutto va rispettato un rigido calendario i cui tempi sono scanditi dalla costruzione dell'opera civile. L'esperienza sul campo ha fatto emergere delle difficoltà (superate) che spesso nei test sperimentali non sono tenute in considerazione.

Dal punto di vista dell'accuratezza è possibile dire che, in virtù della vastità del sito e in rapporto alla logistica del cantiere, l'uso della fotogrammetria digitale con tre camere vincolate a una barra lineare ha fornito una buona accuratezza del dato in rapporto anche alla qualità di restituzione. Giornalmente sono state prese delle misure di verifica sui resti murari mediante l'uso di una stazione totale per costatare la correttezza delle acquisizioni fotogrammetriche entro i margini di errore previsti alle relative scale di restituzione, rilevando un errore medio al di sotto del limite previsto (CARPICECI 2000).

La ricerca di un sistema per il rilievo delle stratigrafie orizzontali ha presentato le maggiori problematiche a cui si è ovviato mediante l'ausilio di cestelli e piccoli ponteggi. Inoltre, con l'uso di diversi obiettivi calibrati, come ad esempio il 50 mm, è stato possibile ottenere delle riprese fotogrammetriche ad altissima definizione di importanti ritrovamenti ceramici e di resti umani, che richiedevano una scala di rappresentazione più alta.

A.A.

ANDREA ANGELINI, ROBERTO GABRIELLI
Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali
CNR – Roma

BIBLIOGRAFIA

ANGELINI A., GABRIELLI R., CHIEFARI C., GIORGI C., LANDINI B. 2012, *Innovative methodology applied to the preventive excavation of new Metro line C. The experimentation of La Spezia road – Lodi Nord Square Station – in Rome*, in *Proceedings of the 5th International Congress on Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin (Istanbul 2011)*, Roma, I, 260-268.

- BORNAZ L. 2006, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, in F. CROSILLA, S. DEQUAL (eds.), *Laser scanning terrestre, Atti del corso "La tecnica del laser scanning terrestre"* (Udine 2004), Udine, CISM, 1-18.
- CARPICECI M. 2000, *Il rilievo dello spazio architettonico*, Roma, Kappa.
- CARPICECI M. 2012, *Fotografia digitale e architettura. Storia, strumenti ed elaborazioni con le odierne attrezzature fotografiche ed informatiche*, Roma, Aracne.
- CUNDARI C. 2012, *Il rilievo architettonico. Ragioni. Fondamenti. Applicazioni*, Roma, Aracne.
- D'AGATA A.L., ALAURA S. (eds.) 2009, *Quale futuro per l'Archeologia?*, *Atti del Workshop internazionale (Roma 2008)*, Roma, Gangemi.
- GABRIELLI R., REA R. 2011, *Nuove metodologie applicate al rilievo archeologico sui cantieri della Metropolitana. Metodologie e tecnologie innovative di rilievo archeologico sul cantiere di scavo*, in REA 2011a, 197-207.
- GUASTI A., FEDELE D., FUSI F., ROMANO G., MERCATELLI L. 2009, *Misure di riflettanza su materiali in uso in ambito sanitario, industriale e di ricerca. Riflessione speculare e diffusa*, in *Banca Dati Riflettanza dei Materiali - Piano Mirato di Prevenzione sulla Radiazione Riflessa Laser della Regione Toscana D.D.R.T. n. 4276/2009* (<http://www.portaleagentifisici.it> della Regione Toscana).
- MARTONE S. 2011, *Le indagini archeologiche preliminari in ambito urbano. L'esperienza della Linea C*, in REA 2011a, 31-36.
- REA R. (ed.) 2011a, *Cantieristica archeologica e opere pubbliche. La linea C della Metropolitana di Roma*, Milano, Electa
- REA R. 2011b, *La tratta T4: le indagini preliminari*, in REA 2011a, 49-59.
- SGRENZAROLI M., VASSENA G. (eds.) 2007, *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner*, Brescia, Starrylink.

ABSTRACT

Laser scanner and digital photogrammetric systems (photo scanning) must be considered at present two of the main techniques used for archaeological and architectural surveying. The integration of both 3D scanning systems allowed us to improve the scientific knowledge, the management, the use and the safeguarding of Cultural Heritage. The aim of this article is to identify analogies and differences between the two surveying techniques applied to different archaeological contexts. Starting from a general introduction to the concept of measurement and the management of the data acquired from different techniques of surveying, the article focuses on the laser scanner applications with particular attention on the intrinsic properties of the instrument, the problems of measurement and the methodology used during the survey. The second part is focused on the digital photogrammetry applied on a particular archaeological context. Digital photogrammetry was developed and experimented in order to acquire territorial data quickly. The optimization of the working speed, while maintaining accuracy of data, means cost savings and an optimal use of funds. Our workgroup decided to transfer that methodology to the archaeological excavations of Rome Metro Line C in collaboration with some public institutions and private companies. The final results have produced 2D and 3D graphic documentations of all the archaeological area up to highly-accurate ortho-rectified images. Point clouds allowed us to simultaneously view a general 3D model of all open archaeological areas, providing an opportunity for observation and an analysis not possible by other means. Each area can be studied together with the others in a global view of the excavation. Every stratigraphic unit can be displayed in the same area and switched on in the same way as a layer.